Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULARIN SİSMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ NÜMERİK İNCELENMESİ

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF BURIED PIPES UNDER SEISMIC LOADS

İrem TOPRAK GÜLNERGİZ[1], Bahattin Berk AYRAÇMA[2], Berrak TEYMÜR[3]

ÖZET

Zemine gömülü boru hatları, inşaat mühendisliği ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır; bu nedenle, bir boru hattına etkiyen yükleri anlamak, tasarımı için oldukça önemlidir. Bu araştırmanın amacı, sonlu elemanlar analizi prensibiyle çalışan Plaxis 2D programı kullanılarak, özellikle maksimum ivme ve düşey yer değiştirme açısından, gömülü boru hatlarının sismik yükler altındaki davranışını incelemektir. İlk olarak, model boyutları (50x30 m) sabit tutulmuş ve model içerisine yerleştirilen borunun gömme derinliği değiştirilmiştir. Zemin hem sıkı kum hem de gevşek kum kullanılarak modellenmiş ve harmonik yük model tabanından uygulanmıştır. Elde edilen ivme-zaman grafikleri incelendiğinde, maksimum ivme ve düşey yer değiştirme değerlerinin, zemin ve dolgu malzemesinden alınan noktalara bakıldığında önemli ölçüde değişmediği sonucuna varılmıştır. Analizlerin ikinci kısmında ise boru çapının 4 katı derinliğe gömülen borunun üzerine serilecek dolgu malzemesinin değiştirilmesinin, zemin modelinin sismik etkiler altındaki davranışını nasıl etkileyeceği incelenmiştir. Analizler, sıkı kum zemin modelinde iki farklı dolgu malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir: sıkı dolgu ve gevşek dolgu. Gevşek dolgu ve sıkı dolgu malzemelerinden elde edilen maksimum ivme ve düşey yer değiştirme değerleri önemli ölçüde aynı değerleri vermiştir.
Anahtar Kelimeler: *Gömülü boru, Gömme derinliği, Harmonik yük, Dolgu Malzemesi, Maksimum ivme, Düşey yer değiştirme*

ABSTRACT

Buried pipelines are commonly utilized in civil engineering and other fields therefore, understanding the load on a pipeline is essential for its design. The purpose of this research is to investigate the behavior of buried pipelines under seismic loads, specifically in terms of maximum acceleration and vertical displacement using finite element analysis through Plaxis 2D. Firstly, the model dimensions (50x30 m) were kept constant and the burying depth of the pipe placed inside was changed. The soil was modeled using both dense sand and loose sand. The harmonic load was applied to the model from the bottom. When the resulting acceleration-time graphs were examined, it was concluded that the acceleration values did not change significantly according to points taken from the soil and backfill. The second part of the analysis investigated how changing the backfill material placed on top of the pipe, which was buried to a depth four times the pipe diameter, would affect the behavior of the soil model under seismic loads. Analyses were conducted using two different fill materials: dense fill and loose fill in dense sand soil. The maximum acceleration values obtained from loose-fill and dense-fill materials yield almost identical results.
Keywords: *Buried pipelines, Burial depth, Harmonic load, Backfill material, Maximum acceleration, Vertical displacement*

[1] Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, topraki@itu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, ayracma@itu.edu.tr
[3] Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, teymurb@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Gömülü boru hatları, modern toplumların temel bir altyapı unsurunu oluşturmakta ve kent yaşamında hayati bir rol oynamaktadır. Su kanalları, kanalizasyon sistemleri, menfezler, atık su arıtma tesisleri, gaz hatları, metro tünelleri ile telefon ve enerji hatları dahil olmak üzere kent yaşamının her alanında karşımıza çıkmaktadır (Wijaya vd., 2019). Bu hatlar inşaat mühendisliği, maden mühendisliği, tarım ve diğer çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanıldığından bir boru hattı üzerindeki yüklerin anlaşılması, hattın tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Dış yükler, çevredeki zemin aracılığıyla yeraltı borularına doğrudan etki etmekte bu sebeple yeraltı yapılarının tasarımında zemin-yapı etkileşimi kritik bir önem taşımaktadır. Zemin türü, sıkılık, su muhtevası ve yapının gömülme derinliği, zemin-yapı etkileşiminde rol oynayan unsurlardır. Gömülü borulara etki eden yükler, borunun ve onu çevreleyen zeminin rijitlik özelliklerine bağlıdır. Bu durum, statik yollarla belirlenemeyen bir sorun teşkil eder ve nitekim boru üzerindeki zemin basıncı yer değiştirmelere yol açmaktadır (Alzabeebee vd., 2018). Yaşam standartlarını iyileştirmeleri nedeniyle, gömülü boru hattı sistemlerinin kullanımı son 60 yılda hızla artmıştır. Bu boru hatları, hizmet ömürleri boyunca zorlu işletme koşullarına ve önemli deformasyonlara maruz kalabilmektedir. Örneğin, Kuzey Amerika'da her gün toplam 850 ana su borusu arızası meydana gelmekte ve bu durum yıllık 3 milyar doları aşkın onarım maliyetine yol açmaktadır (Saadeldin vd., 2015). Söz konusu boru hatları genellikle zeminin en üst katmanlarına gömülmektedir. Bu nedenle, değişken geo-çevresel koşullardan önemli ölçüde etkilenirler. Bu değişken koşullar zeminin su içeriğinde değişikliklere yol açabilmekte ve bu da zeminin su emme kapasitesinde önemli değişimlere neden olmaktadır.

Gömülü borulara yönelik teknik açıdan sağlam bir tasarım analizi; boru özelliklerini, iç ve dış yükleri, dolgu ve yan dolgu malzemelerini, gömme derinliğini, sıkıştırma kalitesini ve yol kaplaması yükleri gibi çevresel koşulları dikkate almalıdır. Wei ve diğ. (2021), boru duvarı kalınlığının numuneler üzerindeki gerilme etkilerini göstermek amacıyla, 1 mm ve 2 mm duvar kalınlığına sahip iki tür boru hattı seçmişlerdir. Araştırmacılar, daha kalın duvarlı boru hatlarının hem sol üst hem de sağ alt taraflarındaki şekil değiştirme tepkisinin nispeten düşük olduğunu ayrıca hem tepe basma şekil değiştirmesinin hem de tepe çekme şekil değiştirmesinin fay hattından yaklaşık 500 mm uzaklıkta meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Bu durum, daha kalın duvarlı boru hatlarının fay hareketine karşı daha yüksek bir dirence sahip olduğunu göstermektedir. O'Rourke ve diğ. (2008), hem kuru hem de kısmen suya doygun kum üzerinde büyük ölçekli doğrultu atımlı fay modellemesi ve santrifüj deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, HDPE borularda, gömülme derinliğinin (H) boru çapına (D) oranı arttıkça daha az deformasyon meydana gelebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu nedenle daha derin gömülme seviyeleri önermişlerdir. Jahromi ve diğ. (2018), boru gömülme derinliğinin eğimli arazilerde gömülü boruların deformasyonları üzerindeki etkisi araştırmıştır. Buna göre boru gömülme derinliğinin etkisi, şevin konumuna ve sismik davranışına bağlıdır. Şev topuğu ve alt kesimlerde daha derin gömülme boru deformasyonlarını azaltabilirken, şevin üst kesimleri ve şev tepesinde daha derin gömülme daha büyük deformasyonlara yol açabilmektedir. Ancak bundan farklı olarak Vatani Oskouei ve diğ. (2019), doğrultu atımlı faylanma sırasında H/D oranının borular üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı H/D değerlerine sahip on farklı deney hazırlanmış ve diğer değişkenler tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Zemindeki düşey deformasyonlar, H/D oranının artmasıyla doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Deneysel sonuçlar, H/D oranının birim şekil değiştirmeyi doğrudan etkilediğini ve bu nedenle gömülme derinliğinin

azaltılmasının, gömülü boru sistemlerinde meydana gelebilecek hasarların azaltılmasına yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Ozhan (2016), oluşturduğu zemin modeline Kocaeli depremi ivme kaydını uygulamış ve sıkı kum zemin içerisindeki dolgu malzemelerini değiştirerek elde edilen ivme-zaman grafiklerini incelemiştir. Buna göre, sonuçlar incelendiğinde, gevşek dolgu ve sıkı dolgu malzemelerinin değiştirilmesinin ivme değerlerini önemli ölçüde değiştirmediği anlaşılmıştır. Ayrıca çalışmada, Kobe ve Kocaeli depremlerine ait ivme kayıtlarını sıkı kum zemine uygulayarak elde ettiği düşey yer değiştirme-zaman grafiklerinde, dolgu malzemesi değişiminin düşey yer değiştirmeleri etkilemediği görülmüştür.

Bu çalışmada, gömülü boru hatlarının sismik davranışı PLAXIS 2D kullanılarak incelenmektedir. Harmonik yükleme koşulları altında, gömme derinliği ve dolgu özelliklerinin zemin-boru sisteminin dinamik tepkisi üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Boru hattı sisteminin sismik performansını değerlendirmek amacıyla, temel parametreler olarak maksimum ivme ve düşey yer değiştirme kullanılmıştır.

2. METODOLOJİ

Kumlu zemin tabakaları için gerilme dağılımını belirlemek amacıyla, küçük şekil değiştirme rijitliğine sahip "hardening soil" (pekleşen zemin) modeli kullanılmıştır. Plaxis 2D'de uygulanan küçük şekil değiştirme rijitlikli "hardening soil" modeli, standart "hardening soil" modelini temel almaktadır. Birim şekil değiştirmeyle birlikte kayma modülünde meydana gelen değişimi açıklamak için yalnızca iki ek parametreye ihtiyaç duyulmuştur. Bunlardan biri başlangıç veya çok küçük şekil değiştirme kayma modülü (G_0), diğeri ise sekant kayma modülünün (G_s) G_0 değerinin yaklaşık %70'ine düştüğü kayma şekil değiştirme seviyesidir ($\gamma_{0.7}$). Alternatif rijitlik parametreleri de dahil olmak üzere diğer tüm parametreler, standart "hardening soil" modelindekiyle aynı kalmaktadır. G_0^{ref}, referans minimum asal gerilme ($-\sigma'_3=p^{ref}$) değerinde, çok küçük şekil değiştirmelerdeki ($\varepsilon < 10^{-6}$) kayma modülünü tanımlamaktadır. Poisson oranı (υ_{ur}), diğer tüm durumlarda olduğu gibi Plaxis 2D'de de sabit kabul edilmektedir. Böylece, G_0^{ref} kayma modülü, Eşitlik 1 kullanılarak çok küçük şekil değiştirme Young modülünden de hesaplanabilmektedir.

$$G_0^{ref} = \frac{E_0^{ref}}{2(1+\nu_{ur})} \quad (1)$$

Bu modelde kullanılan parametreler, rölatif sıkılığa dayalı Brinkgreve korelasyon denklemleri kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre; gevşek kum (Dr=%25), sıkı kum (Dr=%100) ve sıkı dolgu malzemeleri için HS-small model parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Sıkı kum zemin için %15'lik bir sönüm oranı tanımlandığında, literatürle daha uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle, çalışmanın devamında kullanılacak zemin modellerindeki zeminler için %15 sönüm oranı uygulanmıştır. Plaxis 2D'de dinamik yük, bir girdi değeri ve bir çarpan aracılığıyla tanımlanır. Her bir zaman adımındaki gerçek dinamik yük değeri, girdi değeri ile çarpanın çarpımına eşittir. Harmonik yük, modele "Create line displacement" (Çizgisel yer değiştirme oluştur) komutu kullanılarak taban kısmından uygulanmıştır. Düşey doğrultuda yer değiştirme sabitlenmiş yatay doğrultuda ise ivme kaydına ait $u_{x,\,start,\,ref}$ değerinin yarısı 0,5 m değeri esas alınmıştır. Dinamik yük olarak uygulanacak yer değiştirme, modele ivme cinsinden genlik ve frekans değerleri girilerek tanımlanmıştır. Genlik değeri 1 m/s² olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Kumlu zemin tabakaları için küçük şekil değiştirmeler ile pekleşen zemin modeli parametreleri (Yahyavi Zanjavi, 2016)

Sembol	Birim	Brinkgreve Denklemleri	Gevşek Kum (Dr=%25)	Sıkı Kum (Dr=%100)	Gevşek Dolgu	Sıkı Dolgu
γ_n	kN/m^3	15+ 4.0 Dr/100	16	19	14	16
γ_d	kN/m^3	19+ 1.6 Dr/100	19.4	20.6	18	19.4
E_{50}^{ref}	kN/m^2	60000 Dr/100	15000	60000	10000	15000
E_{oed}^{ref}	kN/m^2	60000 Dr/100	15000	60000	10000	15000
E_{ur}^{ref}	kN/m^2	180000Dr/100	45000	180000	30000	45000
m	-	0.7-Dr/320	0.622	0.387	0.65	0.622
C'_{ref}	kN/m^2	-	1.0	1.0	1.0	1.0
f	o	28+12.5Dr/100	31	40.5	25	31
y	o	2+12.5 Dr/100	1	10.5	0	1
R_f	-	1-Dr/800	0.969	0.875	0.990	0.969
$\gamma_{0.7}$	-	(2-Dr/100)x10^{-4}	1.8E-4	1E-4	1.8E-4	1.8E-4
G_0	kN/m^2	60000+68000Dr/100	77000	128000	40000	77000
ν_{ur}	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

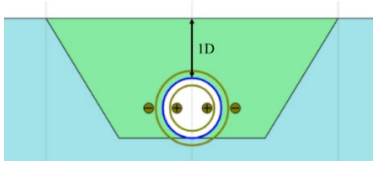
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, 50x30 m boyutlarındaki sıkı kum zemin modeline tabanından aynı harmonik yükün uygulandığı ve bunun sonucunda ivme-zaman grafiklerinin elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen Plaxis 2D analizlerinde, zemin modeli için sıkı kum parametreleri kullanılmıştır. Kalibre edilmiş modelde zemin derinliği 30 m olduğundan, H derinliği 30 m olarak kabul edilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği incelendiğinde, sıkı zeminler için $(V_s)_{30}$ değeri 200 m/s olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, zeminin doğal frekansı Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_1 = \frac{V_S}{4H} \tag{2}$$

Zemine tabandan uygulanan harmonik hareketin frekansı 1,66 Hz olduğundan, bu değer zeminin doğal frekansı olan f_1=1,66 Hz ile oranlandığında 1 değeri elde edilmektedir. f_2 değeri f_1 değerinden büyük olamayacağından, 1'e en yakın tek sayı olan 3 Hz, f_2 değeri olarak belirlenmiştir. Literatürde daha önce modellenmiş olan zemin modelini kalibre etmek amacıyla, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak, zemin içine herhangi bir boru yerleştirilmeksizin zemin tabanından harmonik bir yük uygulanmıştır. Bu çalışmada, zemin modeli boyutları 50x30 m olarak belirlenmiş ve HS-small modeli parametreleri esas alınarak zemin malzemesi olarak sıkı kum kullanılmıştır. Modelin deformasyon sınır koşulları yan yüzeyler serbest, model tabanı ise "Compliant base" (esnek taban) olarak tanımlanmış ve modelin yan yüzeyleri ile tabanına "arayüz" (interface) elemanı eklenmiştir. C_1 ve C_2 katsayıları 1 olarak kabul edilmiştir.

2.1. Gömme Derinliğinin Değiştirilmesi

Oluşturulan zemin modellerinde, model boyutları (50x30 m) sabit tutulmuş ve içine yerleştirilen borunun gömülme derinliği değiştirilmiştir. Gömülü boru olarak HDPE boru kullanılmış ve borunun çapı 400 mm ve duvar kalınlığı 12 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 1).

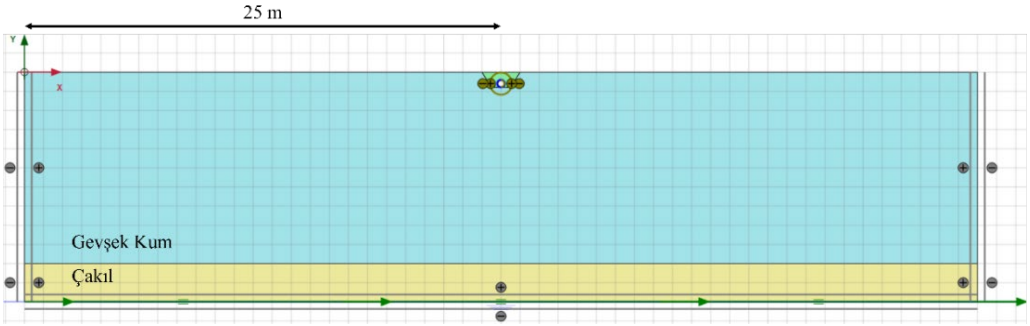


Şekil 1. HDPE boru kesiti (1D gömülme derinliği)

Zemine gömülü boru Plaxis 2D'de tasarlanırken "plate" olarak tanımlanmış olup eksenel rijitlik (EI) parametresi 460 kNm2/m, eğilme direnci (EA) parametresi 4560 kN/m olarak alınmıştır (Yahyavi Zanjavi, 2016). Hem gevşek hem de sıkı kum zeminler için ayrı ayrı dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki zemin türü için de dolgu malzemesi olarak sıkı dolgu malzemesi kullanılmıştır. Zemin tabanından uygulanacak harmonik yük, kum zemin tabakasının altına yerleştirilen 2 metre kalınlığındaki çakıl tabakasının altındaki kısımda tanımlanmıştır.

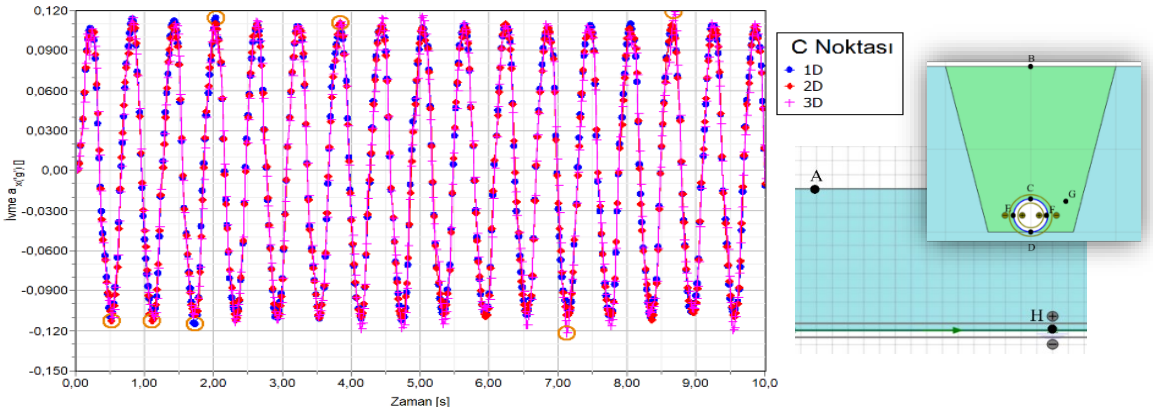
Gevşek Kumlu Zeminlerde Gömme Derinliğinin Değiştirilmesi

Şekil 2'de gösterildiği üzere, dolgu malzemesi olarak gevşek kum ve sıkı kumun kullanıldığı bir zemin modeli oluşturulmuştur. Analiz süreci zeminin kazılması, borunun yerleştirilmesi ve dolgu malzemesiyle örtülmesi ve son olarak oluşturulan model üzerinde dinamik analiz yapılması olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Her bir analizde, borunun içine yerleştirilebilmesi amacıyla zemin yamuk kesitli bir formda kazılmıştır. Boru ile onu çevreleyen dolgu malzemesi arasındaki etkileşimin analiz sonuçlarına doğru bir şekilde yansıtılmasını sağlamak için boru çevresinde ara yüzeyler tanımlanmıştır. Gevşek kum zemine yerleştirilen boru merkezinin yatay konumu 25 m'de sabit tutulmuştur.



Şekil 2. Gevşek kumlu zemin ve sıkı dolgudan (1D gömülme derinliği) oluşan model

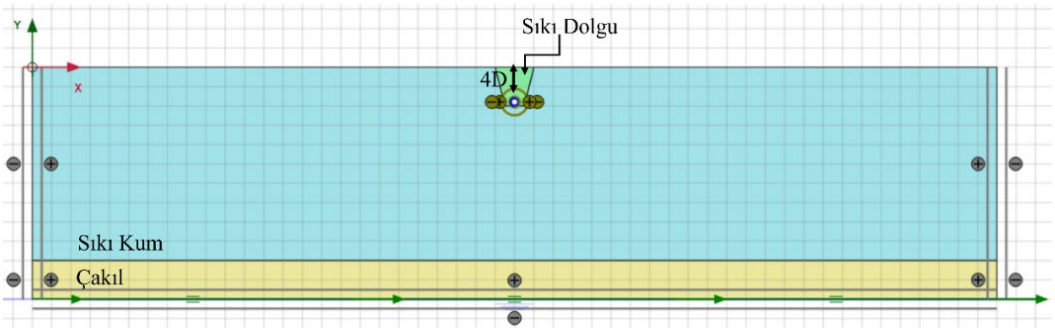
Düşey eksen boyunca gömülme derinliği 1D, 2D ve 3D olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu değişimler sonucunda elde edilen maksimum ivme ve maksimum düşey yer değiştirme değerleri incelenmiştir. Analizlerde, model tabanına 1,66 Hz frekanslı sinüzoidal bir dalga uygulanmasının ardından boru, zemin ve dolgu üzerindeki noktalara ait maksimum ivme sonuçları değerlendirilmiştir. Gevşek kum zeminde gerçekleştirilen dinamik analizde, boru gömülme derinliğinin değiştirilmesinin ivme değerlerini önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir. C noktasından elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 3'te sunulmuştur.



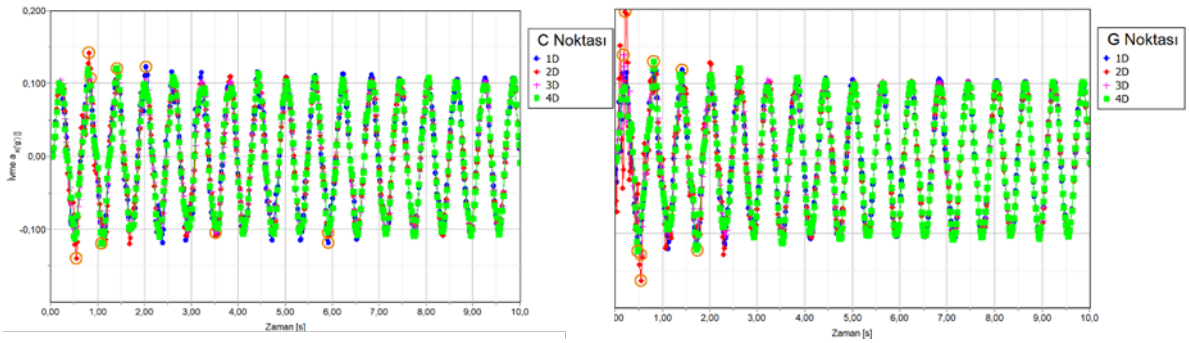
Şekil 3. Borunun gömülme derinliğindeki değişime bağlı olarak elde edilen ivme-zaman grafiği

Sıkı Kumlu Zeminlerde Gömme Derinliğinin Değiştirilmesi

10 metre kalınlığında sıkı bir kum tabakası ve bunun altında 2 metre kalınlığında bir çakıl tabakası modellenmiş; boru üzerindeki dolgu malzemesi olarak ise sıkı bir dolgu malzemesi kullanılmıştır (Şekil 4). Gömülü borunun gömülme derinliği 1D, 2D, 3D ve 4D olarak değiştirilmiş ve model üzerinde dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Önceki analizlere benzer şekilde, harmonik yükün genliği 1 m/s² ve frekansı 1,66 Hz olarak belirlenmiştir. Dinamik analizler incelendiğinde, zemin ve dolgu üzerindeki ivme değerlerinin, gömülü borunun gömülme derinliğindeki değişimlerle birlikte önemli ölçüde değişmediği görülmüştür. Tüm gömülme derinlikleri için zemin ve dolgu üzerinde analiz edilen noktalarda benzer maksimum ivme değerleri elde edilmiştir. Ancak, boru üzerindeki noktalar (C noktası) ve borunun hemen bitişiğindeki nokta (G noktası) incelendiğinde, maksimum ivme değerlerinde bazı farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Sıkı zemin modelinde, borunun gömülme derinliğindeki değişime bağlı olarak elde edilen ivme-zaman grafikleri

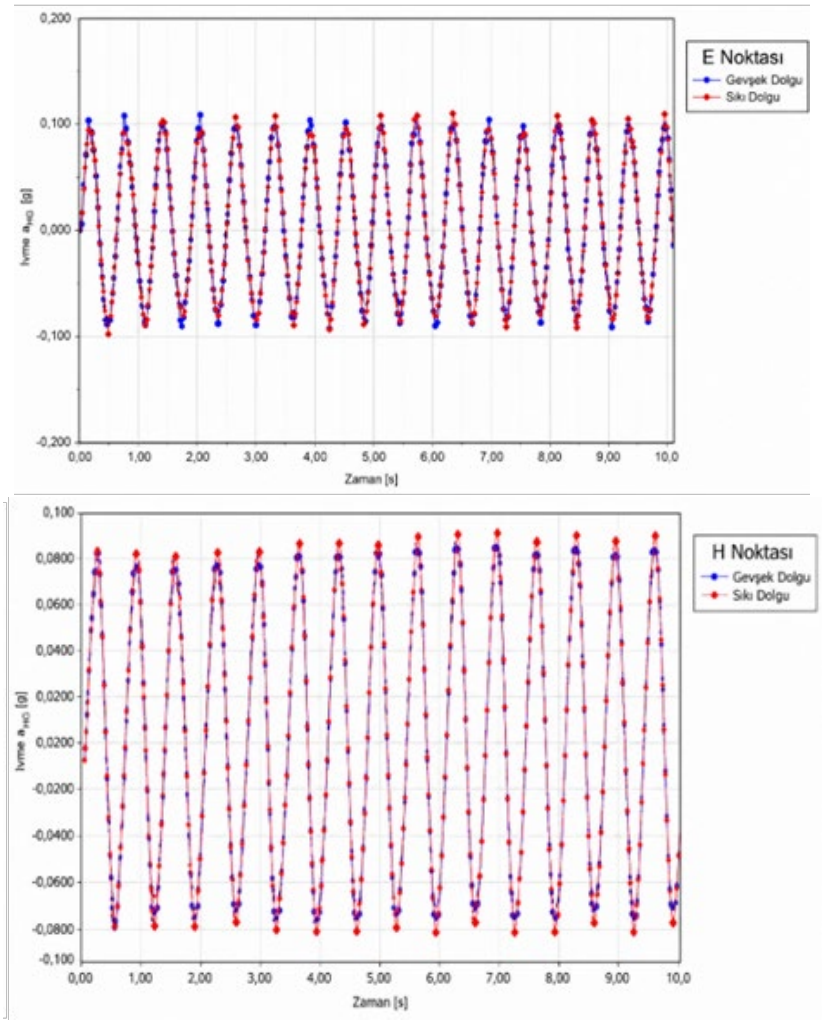


Şekil 5. Sıkı kum zemin modelinde borunun gömülme derinliğindeki değişime bağlı olarak elde edilen ivme-zaman grafikleri

2.2. Dolgu Malzemesinin Değiştirilmesi

Dinamik analizlerde, kum zemin kazılıp boru yerleştirildikten sonra kazı alanı dolgu malzemesi ile kapatılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, sıkı kum zemin içindeki dolgu malzemelerinin özellikleri değiştirilmiş; 4D derinliğine gömülen borunun ve zeminlerin davranışı, maksimum ivme ve maksimum yer değiştirmeler ile uygulanan harmonik yükten nasıl etkilendikleri açısından incelenmiştir. Bu doğrultuda, 10 m derinliğinde sıkı kum ve 2 m derinliğinde çakıl katmanlarından oluşan bir zemin modeli oluşturulmuş ve gömülü boru, 4D dolgu derinliğine yerleştirilmiştir. Dinamik analizler, dolgu malzemesi olarak sıkı ve gevşek dolgu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıkı ve gevşek dolgu için gerekli parametreler, HS-small modeline göre Tablo 1'de verilmiştir. Böylece, 2 farklı dolgu malzemesi için yapılan dinamik analizlerde gömülü borunun, sıkı kum zeminin ve dolgu

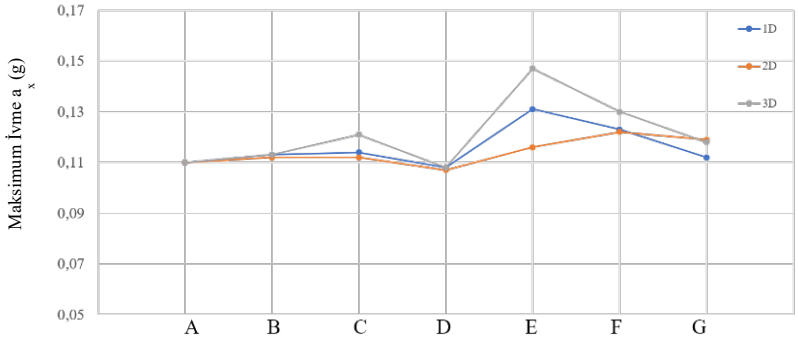
malzemesinin davranışları incelenmiştir. Buna göre, boru üzerindeki bir noktadan (E) alınan verilerle ivme-zaman grafikleri oluşturulduğunda, ivme değerlerinde küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Maksimum ivme değeri, sıkı dolgu malzemesi ile yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilmiştir. Sıkı kum zemin tabanının hemen altındaki noktadan (H) elde edilen verilere göre ise, her iki dolgu malzemesi için de tüm ivme değerleri aynı çıkmıştır (Şekil 6).



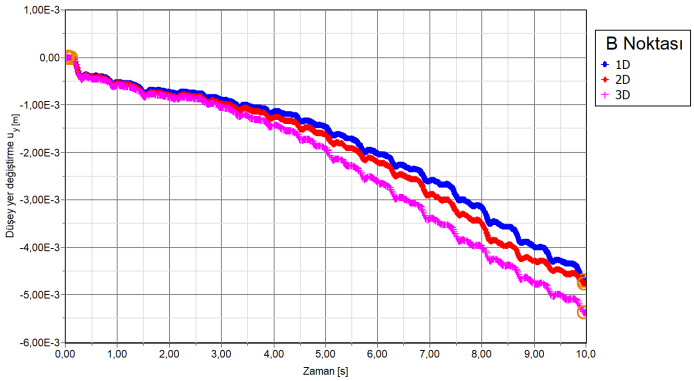
Şekil 6. Sıkı kum zemin modelinde dolgu malzemesindeki değişime bağlı olarak elde edilen ivme-zaman grafikleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gevşek kum zemin ve sıkı dolgudan oluşan zemin modelinde, gömülme derinliğindeki değişikliklerden kaynaklanan maksimum ivme farkları Şekil 7'de gösterilmektedir. Düşey yer değiştirme-zaman grafikleri maksimum ivme değerleriyle birlikte incelendiğinde, gömülü borunun gömülme derinliğinin değiştirilmesinin maksimum oturma miktarlarında önemli bir değişikliğe yol açmadığı gözlemlenmiştir. Örneğin, B noktasından elde edilen dinamik analiz sonuçlarına göre borunun gömülme derinliğinin değiştirilmesiyle elde edilen düşey yer değiştirme-zaman grafiği incelendiğinde, 3D gömülme derinliğine sahip borunun nispeten daha fazla oturduğu görülmektedir (Şekil 8). Ancak bu fark, sayısal olarak oldukça küçük bir değere sahiptir.



Şekil 7. Gevşek kumda gömülme derinliğindeki değişime bağlı ivme farklılıkları



Şekil 8. B noktasındaki boru gömme derinliğine bağlı olarak düşey yer değiştirme-zaman grafiği

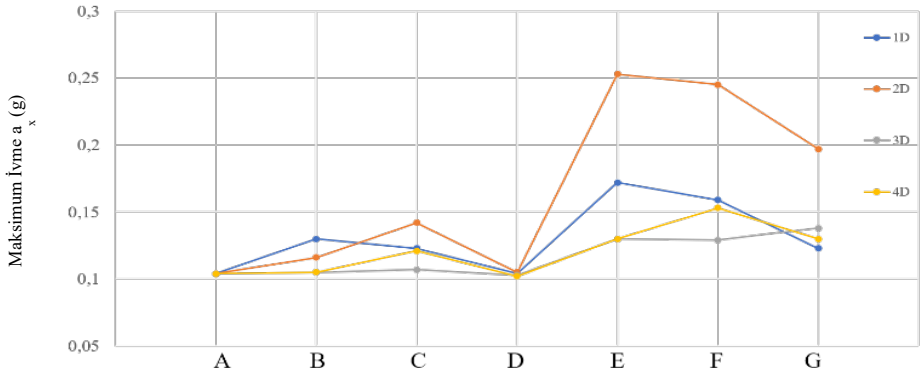
Sonuç olarak, gevşek kum zemin üzerinde gerçekleştirilen dinamik analizler; gömme derinliğindeki değişimlere bağlı olarak zemin, boru ve dolgu malzemesinin davranışları karşılaştırıldığında, maksimum ivme ve maksimum düşey yer değiştirme değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. İlgili analiz sonuçlarının bir özeti Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Gevşek kum zeminde boru gömme derinliğinin değişimine bağlı olarak elde edilen maksimum ivme ve düşey yer değiştirme değerleri

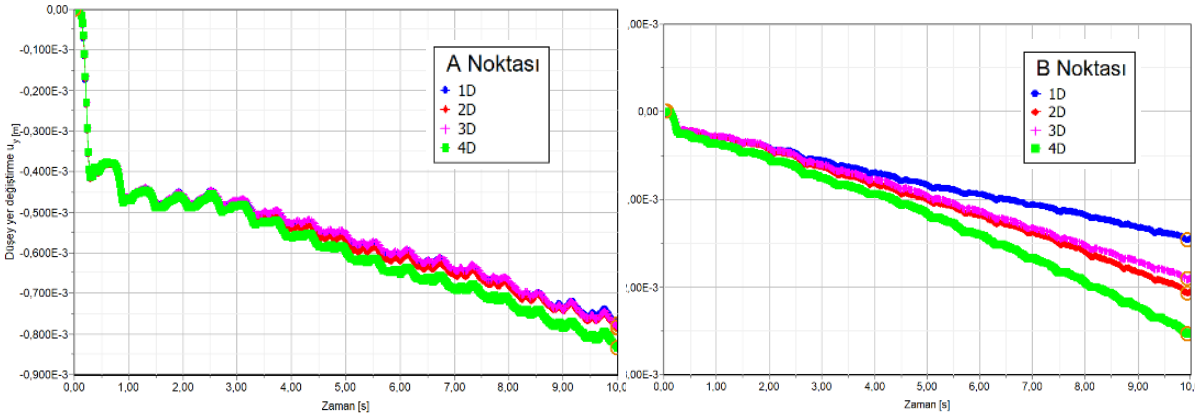
	İvme, a_x (g)			Düşey Yer Değiştirme, u_y (mm)		
Gömme Derinliği	1D	2D	3D	1D	2D	3D
A Noktası	0,110	0,110	0,110	4,00	4,00	0,40
B Noktası	0,113	0,112	0,113	4,70	4,75	5,37
C Noktası	0,114	0,112	0,121	4,40	4,08	4,31
D Noktası	0,108	0,107	0,108	4,40	4,08	4,27
E Noktası	0,131	0,116	0,147	4,40	4,01	4,21
F Noktası	0,123	0,122	0,13	4,50	4,22	4,25
G Noktası	0,112	0,119	0,118	4,70	4,30	4,56
H Noktası	0,930	0,93	0,930	Kabarma meydana geliyor.		

Sonuçlar değerlendirildiğinde, gevşek kum ve sıkı dolgudan oluşan zemin modelinde, maksimum ivme değerlerinin gömülme derinliğindeki değişimlerle önemli ölçüde farklılık göstermediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, düşey yer değiştirme sonuçları incelendiğinde, dolgu üzerindeki noktalarda düşey yer değiştirme değerlerinin, gömülme derinliği arttıkça hafifçe yükseldiği görülmüştür. Yine de genel olarak, sismik etkiler altında düşey yer değiştirme değerleri, gömülme derinliğindeki değişimlerden önemli ölçüde

etkilenmemiştir. Analizlerden elde edilen ivme-zaman grafiklerine dayanarak, sıkı kum zemin ve sıkı dolgu malzemesinden oluşan modelde borunun gömülme derinliğine bağlı olarak maksimum ivme değerlerinde meydana gelen farklılıklar Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Sıkı kumda gömülme derinliğindeki değişime bağlı ivme farklılıkları



Şekil 10. Borunun gömülme derinliğine bağlı olarak düşey yer değiştirme-zaman grafikleri

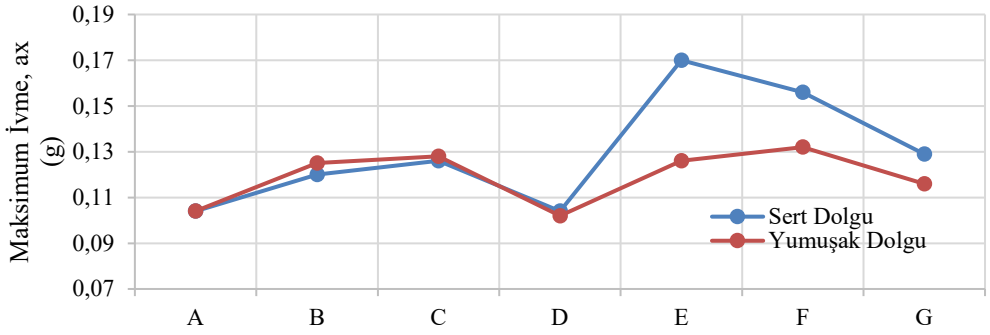
Tablo 3. Sıkı kum zeminde boru gömme derinliğindeki değişime bağlı olarak elde edilen maksimum ivme ve düşey yer değiştirme değerleri

	İvme a_x (g)				Düşey Yer Değiştirme, u_y (mm)			
Gömme Derinliği	1D	2D	3D	4D	1D	2D	3D	4D
A Noktası	0,104	0,104	0,104	0,104	0,75	0,79	0,78	0,83
B Noktası	0,13	0,116	0,105	0,105	1,46	2,07	1,91	2,52
C Noktası	0,123	0,142	0,107	0,121	1,05	1,06	0,96	0,81
D Noktası	0,104	0,105	0,103	0,102	1,05	1,06	0,86	0,67
E Noktası	0,172	0,253	0,13	0,13	1,22	1,20	1,02	0,97
F Noktası	0,159	0,245	0,129	0,153	1,24	1,28	1,02	0,99
G Noktası	0,123	0,197	0,138	0,13	1,49	1,58	1,20	1,17
H Noktası	0,092	0,092	0,092	0,092	Kabarma meydana geliyor.			

Sıkı kum zemin üzerinde gerçekleştirilen analizler, gömme derinliğine bağlı olarak zemin yüzeyindeki noktalarda (A noktası) düşey yer değiştirme değerlerinin değişmediğini ortaya koymuştur. Sıkı dolgu içindeki noktalarda (B noktası) ise, gömme derinliği arttıkça maksimum oturma değerlerinin bir miktar arttığı gözlemlenmiştir; ancak kayda değer bir farklılık görülmemiştir (Şekil 10). Sonuç olarak, sıkı kum zemin üzerinde gerçekleştirilen dinamik analizlerde gömme derinliğinin zemin, boru ve dolgu malzemesinin davranışı

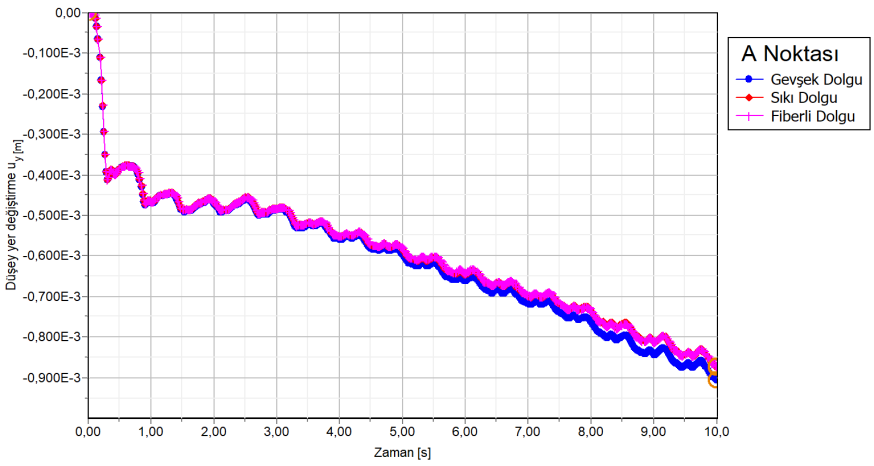
üzerindeki etkisi incelendiğinde, maksimum ivme ve düşey yer değiştirme değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. İlgili analiz sonuçları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Sıkı kum ve sıkı dolgu malzemesi kullanılarak oluşturulan gömülü boru modelinde, gömülme derinliğindeki değişime bağlı olarak maksimum ivme değerlerinde anlamlı bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Benzer bir sonuç, 1,2D ve 2D gömülme derinliklerinin karşılaştırıldığı ve ivme-zaman grafiklerinin benzerlik gösterdiği Yılmaz ve diğ. (2020) çalışmasında da görülmektedir. Düşey yer değiştirmeler incelendiğinde, oturma değerlerinin oldukça küçük ve neredeyse aynı olduğu sonucuna varılmıştır. Dolgu malzemesi söz konusu olduğunda, gömülme derinliğinin artmasıyla birlikte oturma değerlerinin de nispeten arttığı söylenebilir. Gömülü boru üzerine yerleştirilecek sıkı kum zemin ile sıkı ve gevşek malzemelerin değişimine göre gerçekleştirilen dinamik analizlerde ortaya çıkan maksimum ivme farkları Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Borunun gömülme derinliğine bağlı olarak düşey yer değiştirme-zaman grafikleri.

Farklı özelliklere sahip dolgu malzemeleri kullanılarak gömülü boru sistemi üzerinde gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda; boru, sıkı kum zemin ve dolgu malzemesinden elde edilen düşey yer değiştirme-zaman grafikleri incelendiğinde, oturma miktarları arasında önemli bir fark gözlemlenmemiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Dolgu malzemesine bağlı düşey yer değiştirme-zaman grafiği

Sıkı kum zemin, gömülü boru ve dolgu üzerindeki noktalardan elde edilen sonuçlara göre, farklı dolgu malzemelerine bağlı olarak maksimum ivme ve maksimum düşey yer değiştirme değerlerindeki değişimler Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Dolgu malzemesinin değişimine bağlı olarak elde edilen maksimum ivme ve düşey yer değiştirme değerleri

	Sıkı Dolgu		Gevşek Dolgu	
Nokta	İvme a_x(g)	Düşey Deplasman u_y (mm)	İvme a_x(g)	Düşey Deplasman u_y (mm)
A	0,104	0,876	0,104	0,908
B	0,12	0,236	0,125	0,279
C	0,126	0,827	0,128	0,608
D	0,104	0,738	0,102	0,616
E	0,17	0,750	0,126	0,720
F	0,156	0,937	0,132	0,823
G	0,129	1,238	0,116	1,198
H	0,093	Kabarma meydana geliyor.	0,093	Kabarma meydana geliyor.

4. SONUÇLAR

Gömülü boru hatları, altyapı sistemlerini oluşturan en önemli yapılardan biridir. Bu nedenle, gömülü boruların olası sismik yükler altındaki davranışı büyük önem taşımaktadır. Literatürdeki çalışmalardan da görülebileceği üzere, gömülü boruların sismik yükler nedeniyle hasar görmesi mümkündür. Sismik yükler borularda deformasyonlara yol açarken, depremin ikincil etkilerine müdahale edilememesi sebebiyle başka felaketler de meydana gelebilmektedir. Örneğin, deprem sonrasında çıkan yangınlar, hasar gören gömülü doğal gaz borularından sızan gazın etkisiyle giderek büyüyebilir ve ciddi kayıplara yol açabilir. Bu sebeplerden ötürü, gömülü boruların sismik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi gerekmektedir.

Gevşek kumlu zemin ve sıkı dolgudan oluşan gömülü boru sisteminde, zemin yüzeyine 10 saniye boyunca 1,66 Hz frekanslı harmonik hareket uygulanmış ve gömülme derinliği değiştirilerek 1D, 2D ve 3D durumlardaki değişimler gözlemlenmiştir. Dolgu ve boru üzerindeki noktalardan alınan verilere göre gömülme derinliğinin değiştirilmesi, ivme değerlerini önemli ölçüde etkilememiştir. Aynı analiz, sıkı kumlu zemin ve sıkı dolgudan oluşan gömülü boru sistemi için de gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada analizler; 1D, 2D, 3D ve 4D gömülme derinlikleri için harmonik hareket girdileri değiştirilmeksizin yapılmıştır. Elde edilen ivme-zaman grafikleri incelendiğinde, zemin ve dolgu üzerindeki noktalara göre ivme değerlerinin önemli ölçüde değişmediği sonucuna varılmıştır. Modele harmonik hareket ilk uygulandığında, boru üzerindeki noktalarda gözlenen maksimum ivme değerlerinin nispeten farklılık gösterdiği görülmüş; ancak daha sonra grafikler normalize edilmiştir.

Yapılan çalışmada maksimum düşey yer değiştirmeler incelendiğinde, her bir gömülme derinliği için oturma değerlerinin, zemin ve boru üzerindeki noktalardan elde edilen verilere kıyasla oldukça küçük olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, Yılmaz ve diğ. (2020) tarafından gevşek kumlu zeminlerde yapılan deneylerdeki gömülme derinliğinin ivme değerlerinde önemli değişikliklere neden olmaması gözlemleriyle uyumluluk göstermektedir. Bununla birlikte, bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde, hem sıkı hem de gevşek kumlu zeminlerde, dolgu malzemesi içerisindeki noktalarda gözlemlenen maksimum oturmanın gömülme derinliğinin artmasıyla birlikte nispi olarak arttığı tespit edilmiştir. Analizler, boru çevresinde uygulanan dolgu malzemesinin değiştirilmesinin, sismik etkiler altındaki zemin modelinin davranışını nasıl etkileyeceğini incelemek üzere sürdürülmüştür. Sıkı kumlu zemin koşullarında, sıkı dolgu ve gevşek dolgu olmak üzere iki farklı dolgu malzemesi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Gevşek dolgu ve sıkı dolgu malzemelerinden elde edilen maksimum ivme değerleri benzer sonuçları vermektedir.

Düşey yer değiştirmeler incelendiğinde literatürle uyumlu olarak sıkı dolgu ve yumuşak dolgu değişiminin sismik etkiler altındaki düşey yer değiştirme değerlerini doğrudan etkilemediği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Alzabeebee, S., Chapman, D., Faramarzi, A. (2018), A comparative study of the response of buried pipes under static and moving loads, Transportation Geotechnics, Vol 15, 39-46. 10.1016/j.trgeo.2018.03.001.

Jahromi, H.F., Jafarzadeh, F., Zakaria, M.S. (2018), Experimental study of burial depth effect on embedded pipe deformations in sandy slopes under dynamic landsliding, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 114, 281–297. doi:10.1016/j.soildyn.2018.06.038

O'Rourke, T.D., Jezerski, J.M., Olson, N.A., Bonneau, A.L., Palmer, M., C., Stewart H.E. (2008), Geotechnics of pipeline system response to earthquakes, Keynote paper. In: Proceedings of the geotechnical earthquake engineering and soil dynamics IV, Sacramento, CA, 1–38.

Ozhan, H.O., Bayat, E.E., Zanjani, E.Y. (2016), Dynamic Analysis of Buried Pipelines with Geogrid Reinforcement, 6th European Geosynthetics Congress, Ljubljana, Slovenia.

Saadeldin, R., Hu, Y., Henni, A. (2015), Numerical analysis of buried pipes under field geoenvironmental conditions, International Journal of Geo-Engineering, 6(1).

Wijaya, H., Rajeev, P., Gad, E. (2019), Effect of seismic and soil parameter uncertainties on seismic damage of buried segmented pipeline, Transportation Geotechnics. 21, 100274.

Wei, X., Jiao, W., Zeng, X., Zhang, D., Du, G. (2021), Mechanical Behavior of Buried Pipelines Subjected to Faults, Advances in Civil Engineering, Vol 2021, Article ID 9984519. https://doi.org/10.1155/2021/9984519.

Vatani Oskouei, A., Tamjidi, A., Pourshabani, P. (2019), Effects of burial depth in the behavior of buried steel pipelines subjected to strike-slip fault, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 123, 252–264. doi:10.1016/j.soildyn.2019.04.031.

Yılmaz, M., İkizler, S.B., Teymür, B. (2020), Fiber ile İyileştirilmiş Kum Zemine Gömülü Boruların Dinamik Davranışının Sarsma Tablası Deneyleri ile İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25 (1), 1-12. DOI: 10.17482/uumfd.631236

Yahyavi Zanjavi, E. (2016), Numerical Modelling on Behavior of Flexible Underground Pipelines Under Seismic Loads., Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
γ_n	Tabii birim Hacim Ağırlık	ϕ	Kayma Mukavemeti Açısı
γ_d	Doygun birim Hacim Ağırlık	ψ	Genişleme Açısı
E_{50}^{ref}	Elastisite Modülü	R_f	Yenilme Oranı
E_{oed}^{ref}	Ödometre Modülü	$\gamma_{0.7}$	$G_s=0.722G_0$ Karşılık Gelen Şekil Değiştirme
E_{ur}^{ref}	Yük Boşaltma Modülü	G_0	Kayma Modülü
m	Rijitliğin gerilim seviyesi bağımlılığı için güç	ν_{ur}	Poisson Oranı
C'_{ref}	Kohezyon	σ'_3	Minimum Asal Gerilme
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen		